

## Ajustamento Simultâneo de Equações de Biomassa de Pinheiro Manso no Sul de Portugal

Alexandra Correia\*, Sónia Faias\*, Margarida Tomé\*\*, <sup>1</sup>Mafalda Evangelista\*, João Freire\* e Pedro Ochôa de Carvalho\*\*\*

\*Engenheiro Florestal

\*\*Professora Catedrática

\*\*\*Professor Auxiliar

Instituto Superior de Agronomia. Departamento de Engenharia Florestal, Tapada da Ajuda, 1349-017 LISBOA

<sup>1</sup>AFLOPS - Associação de Produtores Florestais, Rua José Augusto Coelho, n.º133-1.º Dto., 2925-543 AZEITÃO

---

**Sumário.** Apresenta-se um sistema de 4 equações de biomassa acima do solo para *Pinus pinea* L. ao nível da árvore individual que permitem, a partir de dados recolhidos em inventários florestais convencionais, estimar a biomassa total e das componentes: agulhas, ramos, lenho e casca. Foram abatidas 40 árvores na região sul de Portugal e as suas componentes pesadas integralmente. No tratamento estatístico utilizou-se o método do ajustamento simultâneo que tem a vantagem de assegurar a compatibilidade entre os valores preditos pelas equações parciais, com o valor obtido para a biomassa total acima do solo que corresponde ao somatório daquelas 4 equações. Os resultados do ajustamento para a biomassa de casca ( $R^2_{aj}=0,83$ ) e lenho ( $R^2_{aj}=0,95$ ) foram melhores do que para os ramos ( $R^2_{aj}=0,79$ ) e agulhas ( $R^2_{aj}=0,71$ ). A proporção de copa em relação à biomassa total da árvore é elevada, independentemente das características do povoamento. Porém, parece ser exacerbada nos povoamentos esparsos e pela desramação artificial efectuada nos povoamentos geridos, que tem como objectivo favorecer a expansão das copas para produção de pinha. A pior qualidade do ajustamento das componentes da copa poderá ser resultado da variabilidade de condições de gestão dos povoamentos de onde foram seleccionadas as árvores.

**Palavras-chave:** *Pinus pinea* L.; biomassa; modelo alométrico

### Simultaneous Fitting of Biomass Equations for *Pinus pinea* L. in Portugal

**Abstract.** We present a system of allometric biomass equations for aboveground compartments for *Pinus pinea* L. that allows biomass estimation with information from conventional forest inventories. We harvested 40 trees located in south of Portugal and separated and weighed all the aboveground components: needles, stem bark, branches and stem. The equations were simultaneously fitted using seemingly unrelated regression. This method allows the compatibility of the partial allometric equations with the equation for total biomass aboveground that corresponds to the sum of those 4 equations. The models were better for stem ( $R^2_{adj}=0.85$ ) and bark ( $R^2_{adj}=0.83$ ) and worst for branches ( $R^2_{adj}=0.79$ ) and needles

---

<sup>1</sup>º Autor E-mail: alexandrac@isa.utl.pt

( $R^2_{adj}=0.71$ ). Crown biomass was always high compared with aboveground biomass, independently on stand characteristics. However it may be exacerbated by artificial pruning that is carried out to increase crown expansion for pine nut production. The different stand management circumstances from where trees harvested were selected may explain the worst fitting for crown components.

**Key words:** *Pinus pinea* L.; biomass; allometric models

#### **Ajustement Simultané d'Équations de Biomasse de *Pinus pinea* L. au Portugal**

**Résumé.** On présente un système de 4 équations de biomasse au-dessus du sol, au niveau de l'arbre individuel du pin pignon (*Pinus pinea*). Les équations permettent, à partir de données recueillies sur des inventaires forestiers conventionnels, d'estimer la biomasse totale et la biomasse des composants: aiguilles, branches, bois et écorce. On a abattu 40 arbres dans la région sud du Portugal et leurs composants ont été totalement pesés. Dans le traitement statistique, on a utilisé la méthode d'ajustement simultané, dont l'avantage est d'assurer la compatibilité entre les valeurs prédites par les équations partielles, avec la valeur obtenue pour la biomasse totale au-dessus du sol qui correspond à la somme de ces 4 équations. Les résultats de l'ajustement concernant la biomasse de l'écorce ( $R^2_{aj}=0.83$ ) et du bois ( $R^2_{aj}=0.95$ ) ont été meilleurs que ceux concernant les branches ( $R^2_{aj}=0.79$ ) et les aiguilles ( $R^2_{aj}=0.71$ ). La proportion de la cime comparativement à la biomasse totale de l'arbre est élevée, indépendamment des caractéristiques du peuplement. Néanmoins, elle semble être exacerbée dans les peuplements dispersés et par l'ébranchage artificiel effectué dans les peuplements gérés, dont le but est de favoriser l'expansion des cimes pour la production de la pomme de pin. La dégradation de la qualité de l'ajustement des composants de la cime peut être le résultat de la variabilité de conditions de gestion des peuplements d'où on a sélectionné les arbres.

**Mots clés:** *Pinus pinea* L.; biomasse; modèle allométrique

#### **Introdução**

A quantificação da biomassa das florestas é uma questão que tem vindo a ganhar cada vez mais importância no contexto da gestão florestal devido à contribuição das florestas para o ciclo global de carbono. A par da produção dos tradicionais bens comercializáveis, o serviço de sumidouro de carbono surge em Portugal como uma possibilidade de valorizar os espaços rurais devido a 3 aspectos fundamentais:

a) As actividades florestais estão enquadradas no grupo de actividades de contabilização para efeitos de cumprimento dos objectivos de redução de gases com efeito de estufa (GEE) no âmbito de acordos internacionais, nomeadamente a Convenção Quadro das

Nações Unidas para as Alterações Climáticas e voluntariamente no Protocolo de Quioto, ambos assinados e ratificados por Portugal. Isto envolve a contabilização, para além de outras variáveis, do carbono sequestrado pela biomassa viva e também o que é perdido durante a combustão devido aos fogos florestais.

b) Existe a possibilidade futura das unidades de crédito de carbono geradas na preservação do sumidouro, poderem ser economicamente transaccionadas através dos mecanismos flexíveis do protocolo de Quioto ou de mercados voluntários. Esta externalidade (positiva) poderá traduzir-se em benefícios económicos para os proprietários florestais desde que se comprove o efectivo armazenamento de carbono nos reserva-

tórios do ecossistema (vegetação e solo).

c) O aproveitamento da biomassa florestal para fins energéticos tem sido visto como um mercado com grande possibilidade de crescimento mas para isso é necessário quantificar a disponibilidade de resíduos e material florestal para abastecimento das unidades de produção de energia baseadas em biomassa florestal.

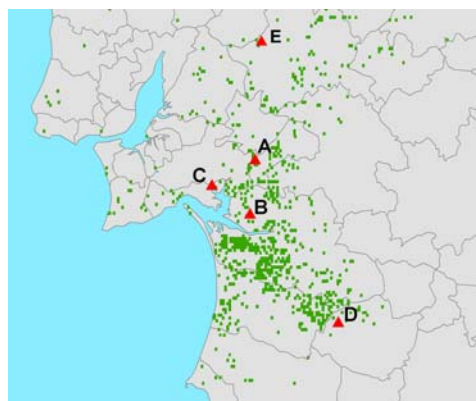
No processo de contabilização dos reservatórios e sumidouros de carbono é necessário que exista uma plataforma de conhecimento aceitável e com fundamento científico sobre a biomassa florestal em Portugal. Este conhecimento é manifestamente insuficiente, como aliás ficou explícito no Programa Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC, 2001). A lacuna é ainda maior quando se trata de espécies tipicamente mediterrâneas (ZIANIS *et al.*, 2005) e com pouca expressão em termos de área como é o caso do pinheiro manso que, em 2006, ocupava 3% do total da área de povoamentos puros e mistos dominantes em Portugal (DGRF, 2007). O conjunto de informação mais escassa diz respeito a modelos de crescimento e produção, modelos alométricos para a estimação da biomassa das diferentes componentes da árvore, factores de expansão do volume em biomassa, factores de conversão da biomassa em carbono e densidade básica da madeira.

Tendo estes aspectos em conta, este trabalho teve como objectivo construir um sistema de equações, de aplicação expedita, a partir de dados recolhidos em inventários florestais convencionais, para estimar a biomassa total acima do solo, ao nível da árvore individual, de pinheiro manso, assim como a biomassa das componentes agulhas, ramos, lenho e

casca.

## Métodos

Foram seleccionadas 40 árvores para amostragem destrutiva distribuídas por 5 povoamentos de pinheiro manso localizados no concelho de Alcácer do Sal (Figura 1).



**Figura 1** - Localização geográfica dos pontos de amostragem destrutiva (▲) (A) 38°37'67" N, 8°37'36" W, (B) 38°33'17"N, 8°47'30"W (C) 38°28'7"W, 8°38'40"N, e (D) 38°08'30"N, 8°18'18" W e (E) 38°57'34"N, 8°25'45"W. Os pontos a verde correspondem à área ocupada por pinheiro manso (povoamentos puros e mistos dominantes) em 1995

Os povoamentos são puros e equiênicos excepto o povoamento (A) que é misto com sobreiro (37%) e pinheiro bravo (3%). As árvores foram seleccionadas de 19 parcelas permanentes de 20 ou 30 m de raio previamente instaladas no local e que estão inseridas em áreas de povoamento com mais de 0,5 ha e com uma densidade de coberto superior a 10%. Em todas as árvores foram medidas as seguintes variáveis: diâmetro a 1,30 m (d), altura total (h), altura da base da copa (hc), diâmetro da copa (cw). Foram ainda registadas todas as características

importantes das árvores como: feridas de resinagem, desramações, doenças ou pragas e presença de bifurcação. Foram igualmente calculadas as variáveis do povoamento, altura dominante (hdom), área basal (G) e nº árvores por ha (N). Tendo como objectivo obter a maior variabilidade de diâmetros, seleccionou-se de forma aleatória um número aproximadamente constante de árvores para abate em cada classe de diâmetro de 10 cm. As variáveis do povoamento e dendrométricas das árvores abatidas apresentam-se nos Quadros 1 e 2.

Consideraram-se 4 componentes da biomassa da árvore na amostragem destrutiva: lenho, casca, agulhas e ramos vivos sendo que neste último grupo se incluem os ramos com dimensão inferior a 2,5 cm, entre 2,5 e 7 cm e maiores do que 7 cm. A informação sobre pinhas foi recolhida, mas os dados não foram utilizados por existirem árvores cujas pinhas do ano haviam sido recolhidas antes do abate. Além disso a produção de pinhas está sujeita a safras e contra-safras, pelo

que o desenvolvimento de equações para a sua predição exige metodologias distintas das usadas neste trabalho.

Com a árvore no chão, o tronco foi medido desde o cepo até à bicada e o tronco fraccionado em toros de 2 m de comprimento. Foi recolhida uma rodela em cada um desses intervalos para determinação do teor de humidade e percentagem de casca. Cada toro foi pesado em fresco com a casca assim como as rodela amostra. As pernadas foram separadas do tronco principal tendo-se seleccionado uma em cada cinco para separação completa das suas fracções. Garantiu-se assim uma amostragem integral das componentes da copa de, pelo menos, 20%. Nestas pernadas amostra foram separadas e pesadas as seguintes componentes: agulhas, ramos de dimensão inferior a 2,5 cm, entre 2,5 e 7 cm, maiores do que 7 cm e pinhas. Uma amostra de cada componente foi guardada para determinação do teor de humidade. A restante copa foi pesada sem separação das componentes.

**Quadro 1** - Variáveis do povoamento medidas nas parcelas onde se realizaram os abates. Entre parêntesis indica-se o número de árvores abatidas em cada povoamento

Local	Nº Parcelas		hdom (m)	N (ha)	G (m²/ha)	d (cm)	h (m)	hc (m)
(A)	6 (15)	Min	13,40	53,06	7,98	8,00	3,70	1,55
		Méd	15,46	77,57	10,11	32,49	11,76	5,80
		Máx	17,76	111,38	12,93	56,34	17,30	13,30
(B)	1 (10)		6,91	580	14,60	14,19	4,07	1,33
(C)	2 (5)	Min	13,90	53	7,97	18,90	8,28	4,00
		Méd	15,55	81	10,79	37,32	12,31	6,02
		Máx	18,13	111	12,92	56,34	17,30	9,70
(D)	2 (4)	Min	10,63	74	7,75	9,23	2,66	1,16
		Méd	12,47	122	8,06	22,08	7,52	3,49
		Máx	14,30	170	8,38	30,90	10,10	6,15
(E)	6 (6)	Min	5,27	20	1,54	6,50	2,10	0,00
		Méd	8,91	69	4,22	26,32	6,02	0,08
		Máx	11,43	120	7,45	47,25	11,30	1,60

**Quadro 2** - Variáveis medidas nas árvores abatidas

	Variável			
	d (cm)	h (m)	hc (m)	cw (m)
Min	6,50	2,10	0,00	2,20
Méd	26,56	8,38	3,46	5,82
Máx	56,34	17,30	10,00	13,60

Em laboratório procedeu-se à determinação do teor de humidade pela pesagem das amostras após secagem em estufa até aquisição de peso constante. A biomassa seca de cada componente da copa foi calculada pelo produto entre a razão peso seco/peso fresco da amostra dessa componente e o peso fresco total da componente, estimado a partir da proporção que a componente representava em relação ao peso fresco total da copa. Em relação ao lenho e casca, a biomassa seca foi calculada pelo produto entre a razão peso seco/peso fresco da amostra de cada componente e o peso fresco total da componente, estimado a partir da proporção que a componente representava em relação ao peso fresco total do tronco.

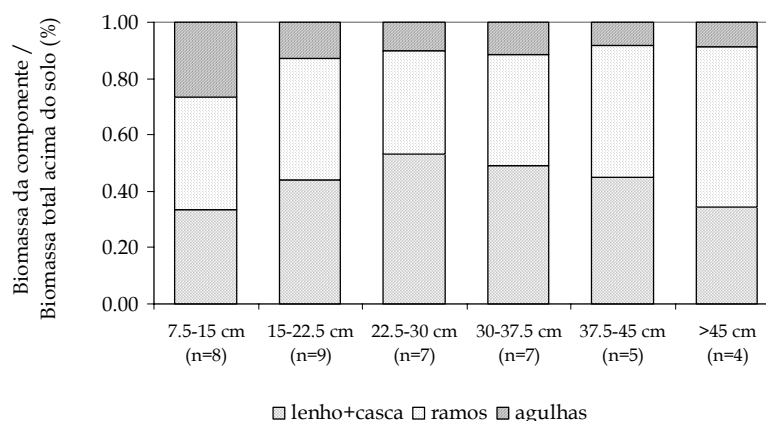
#### Caracterização das árvores

No que se refere aos dados das 40 árvores abatidas, a componente que em termos médios, apresentou mais biomassa foi a dos ramos (45%), seguida do lenho (41%), das agulhas (8%) e da casca (5%). Estas percentagens são muito semelhantes às encontradas em pinheiros mansos de produção de pinha da região de Andaluzia (densidade média de 220 árv./ha e d variável entre 5 e 70 cm) com 46% para lenho e casca, 48% para ramos

e 7% para agulhas (FERNÁNDEZ, 2004).

Estas proporções tendem a variar com a dimensão da árvore. Por exemplo, a proporção de biomassa de agulhas em relação à biomassa total da árvore na classe de 7,5 a 15 cm é de 28% enquanto que na classe superior a 45 cm é de 6% (Figura 3). No que diz respeito à proporção de ramos em relação à biomassa total acima do solo, apesar do reduzido número de observações, parece haver uma tendência para aumento a partir da classe de 22,5-30 cm. De facto, existe uma clara proporcionalidade entre a biomassa de ramos e de lenho em relação à biomassa total, que variam numa razão inversa ( $R^2=68\%$ ).

Este efeito parece ser explicado, em parte, pelas desramações artificiais ou naturais, comuns nestes povoamentos. A eliminação artificial dos ramos da base da copa, por não produzirem flores femininas, ou a mortalidade natural dos ramos ensombrados da base da copa, causado pela competição natural, tem um efeito estimulante do crescimento dos ramos mais altos e mais produtivos, que são também os que apresentam mais biomassa. Por exemplo, as 3 árvores de maiores dimensões encontravam-se trifurcadas sendo as ramificações bastante vigorosas.



**Figura 3** - Média da proporção de biomassa de cada componente em relação à biomassa total da árvore em cada classe de diâmetro. Entre parêntesis o número de observações em cada classe

#### Modelo alométrico

Os modelos alométricos mais comuns na literatura relacionam a biomassa com o diâmetro a 1,30 m e/ou a altura das árvores (ver revisão em ZIANIS *et al.*, 2005). Para algumas espécies, as variáveis profundidade da copa (cl) e proporção de copa (profundidade da copa/altura total da árvore) (cr) substituem a altura da árvore, sobretudo nas componentes da copa, pelo que foram também ensaiadas nos modelos.

Neste estudo testaram-se várias variantes do modelo alométrico simples ou múltiplo:

$$(1) y = k x^a$$

$$(2) y = k x_1^a k x_2^b$$

$$(3) y = k x_1^a k x_2^b, \text{ com } a = a_0 + a_1 z$$

$$(3) y = k x_1^a k x_2^b, \text{ com } b = b_0 + b_1 z$$

onde y é biomassa de agulhas (wl), ramos (wbr), casca (wb), lenho do tronco (ww) e biomassa total aérea (wa). Para x foram testadas as variáveis diâmetro a 1,30 m, altura total, profundidade e

proporção da copa. A variável z é uma variável do povoamento e permite analisar se as constantes alométricas são diferentes de acordo com o povoamento em que a árvore se insere. Testaram-se a densidade do povoamento (N), a altura dominante (hdom) e a área basal (G).

Os modelos testados correspondem a utilizar para cada variável dependente, uma combinação de uma (modelo alométrico simples) ou duas (modelo alométrico múltiplo) variáveis da árvore, testando-se ainda a introdução de cada uma das variáveis do povoamento nas constantes alométricas.

#### Procedimentos para ajustamento e selecção do melhor modelo

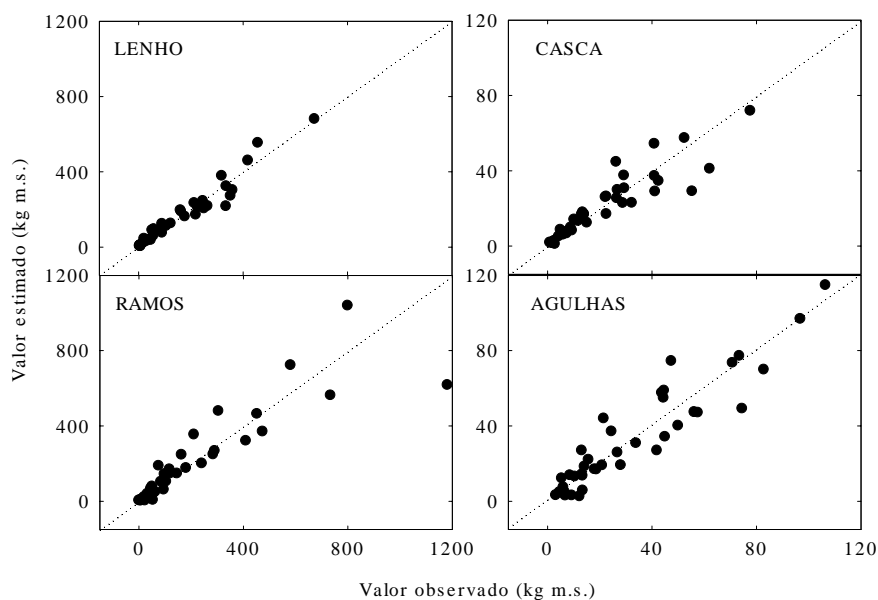
1) Para cada componente foram ajustadas pelo método dos mínimos quadrados, sob a forma não linear, as várias equações alométricas utilizando todas as combinações de variáveis independentes descritas atrás (procedimento PROC NLIN do SAS). O critério de

selecção dos melhores modelos baseou-se nos valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ). Garantiu-se que no modelo seleccionado todos os parâmetros diferiam significativamente de zero, com recurso ao intervalo de confiança assintótico.

2) Após seleccionar o melhor modelo para cada componente analisaram-se os pressupostos de normalidade e homogeneidade da variância do erro do modelo. A figura 4 mostra o gráfico dos valores estimados nos correspondentes valores observados, podendo ver-se que os modelos não são enviesados. A violação destes pressupostos para todos os modelos levou à utilização de regressão ponderada, para corrigir a heterocedasticidade, e ao método de Huber (MYERS, 1990), para ultrapassar a não normalidade dos resíduos. Os pesos foram encontrados pelo método descrito

por (PARRESOL, 1999). Neste método, os resíduos (ou o logaritmo do quadrado dos resíduos) são expressos em função de variáveis da árvore e do povoamento. O modelo que apresentou o melhor ajustamento com todas as variáveis significativas, foi seleccionado como função de ponderação.

3) Depois de seleccionados os modelos para cada componente, foi realizado um ajustamento simultâneo seguindo-se a metodologia descrita por PARRESOL (2001) que consiste na aplicação do método *seemingly unrelated regression* (ITSUR do procedimento MODEL do SAS). Introduziram-se as ponderações dos resíduos e os pesos calculados aquando do ajustamento do modelo para cada componente. A biomassa total que resulta do somatório das equações para cada componente isoladamente, foi também considerada no ajustamento simultâneo.



**Figura 4** - Gráficos dos valores observados contra os valores estimados e gráficos dos resíduos studentizados em função do d

## Resultados e discussão

O sistema de equações finais obtido por ajustamento simultâneo encontra-se no Quadro 3. O diâmetro a 1,30 m e a altura foram as variáveis que produziram os melhores ajustamentos para as componentes estudadas. À semelhança de outros autores (ANTÓNIO *et al.*, 2007; PORTÉ *et al.*, 2002) obtiveram-se igualmente bons resultados com a inclusão de variáveis do povoamento (ver Correia, *et al.* em preparação). Todavia, a inclusão nos modelos das variáveis d e h simultaneamente, parece reflectir de forma satisfatória as características do povoamento.

Para obter uma avaliação geral da performance do modelo apresentam-se no Quadro 4 os valores dos erros padrão das estimativas dos parâmetros antes e após o ajustamento simultâneo. Verifica-se que, de um modo geral, os erros padrão diminuíram com o ajustamento simultâneo resultando por isso numa melhoria da qualidade dos modelos finais.

## Conclusão

O ajustamento simultâneo das 4 equações do lenho, casca, ramos e agulhas produziu resultados satisfatórios.

**Quadro 3** - Equações finais resultantes do ajustamento simultâneo e respectivos coeficientes de determinação ajustados ( $c = \pi \cdot d / 100$ )

Componente	Equação	Estimativa dos Parâmetros	R <sup>2</sup> aj
Agulhas	$wl = k \cdot c^a \cdot (h/d)^b$	$k = 22,27$ ; $a = 1,76$ ; $b = -0,50$	0,71
Ramos	$wbr = k \cdot c^a$	$k = 184,94$ ; $a = 3,03$	0,79
Casca	$wb = k \cdot c^a \cdot h^b$	$k = 8,08$ ; $a = 1,55$ ; $b = 0,47$	0,83
Lenho	$ww = k \cdot c^a \cdot h^b$	$k = 18,85$ ; $a = 1,68$ ; $b = 0,95$	0,95
Total acima do solo	$wa = wl + wbr + wb + ww$		0,92

**Quadro 4** - Valor das estimativas dos parâmetros e respectivos erros padrão antes e após o ajustamento simultâneo

Comp.	Parâm.	Ajustamento Independente		Ajustamento Simultâneo	
		Estimativa	Erro padrão	Estimativa	Erro padrão
Agulhas	k	18,09	4,71	$k = 22,27$ ;	4,99
	a	1,69	0,16	$a = 1,76$ ;	0,14
	b	-0,67	0,21	$b = -0,50$	0,18
Ramos	k	23,56	1,23	$k = 184,94$	12,04
	a	1,84	0,15	; $a = 3,03$	0,20
Casca	k	6,85	2,28	$k = 8,08$ ;	1,77
	a	1,46	0,16	$a = 1,55$ ;	0,12
	b	0,54	0,14	$b = 0,47$	0,10
Lenho	k	19,29	2,76	$k = 18,85$ ;	1,84
	a	1,61	0,10	$a = 1,68$ ;	0,08
	b	0,94	0,06	$b = 0,95$	0,04

\* Para garantir a convergência do sistema foi necessário fixar o parâmetro k da casca



Embora se tenham ensaiado modelos mais complexos com a adição de mais variáveis, os melhores resultados foram sempre obtidos com a inclusão do d e h. Estas são variáveis vulgarmente medidas nos inventários florestais convencionais representando por isso uma vantagem do ponto de vista de aplicação prática.

A elevada longevidade e biomassa que os pinheiros mansos podem atingir, classificam-na como uma espécie interessante do ponto de vista do reservatório de carbono. Por exemplo, o exemplar de maiores dimensões medido neste ensaio com 56,3 cm e 63 anos pesava 1,7 toneladas (peso seco). As equações produzidas permitem ao proprietário florestal obter uma primeira quantificação da biomassa existente dos seus povoamentos de pinheiro manso para a região sul de Portugal.

Duas linhas de investigação com interessante futuro dizem respeito à quantificação da biomassa de raízes, uma vez que este reservatório poderá representar uma fracção importante do carbono total da árvore. Outra será a quantificação do material exportado durante as operações de desramação e desbaste e o seu impacto na capacidade de retenção de carbono do sistema.

### Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio do programa AGRO - Medida 8.1, Desenvolvimento Experimental e Demonstração no âmbito do projecto nº 543 (O sequestro de carbono e a gestão florestal sustentável no sul de Portugal). A informação relativa às parcelas de inventário foram medidas no âmbito do projecto nº 451 (Optimização do Melhoramento e Gestão de Povoamentos

de Pinheiro manso para a Produção da Pinha e do Pinhão). Agradece-se às equipas de campo da AFLOPS, pelo trabalho de recolha da biomassa.

### Bibliografia

- ANTÓNIO, N., TOMÉ, M., TOMÉ, J., SOARES, P., FONTES, L., 2007. Effect of tree, stand and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. *Canadian Journal of Forest Research* **37**: 895-906.
- CORREIA, A., et al., Uncertainties in estimating stand carbon stocks with inventory data: using a Mediterranean pine (*Pinus pinea* L.) as a case study (in preparation)
- DGRF, 2007. <http://www.dgrf.min-agricultura.pt/v4/dgf/pub.php?ndx=3681>. Junho 2007
- FERNÁNDEZ, G.B., 2004. *El pino piñonero (Pinus pinea L.) en Andalucía*. Dirección General de Gestión del Medio Natural Sevilla.
- MYERS, R., 1990. *Classical and Modern Regression with Applications*. PWS publishers.
- PARRESOL, B.R., 1999. Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. *Forest Science* **45**: 573-593.
- PARRESOL, 2001. Additivity of nonlinear biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research* **31**: 865-878.
- PNAC, 2001. *Plano Nacional para as Alterações Climáticas - Floresta e Produtos Florestais*. Instituto do Ambiente, Lisboa.
- PORTÉ, A., TRICHET, P., BERT, D., LOUSTAU, D., 2002. Allometric relationships for branch and tree woody biomass of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecology and Management* **158**: 71-83.
- ZIANIS, D., MUUKKONEN, P., MÄKIPÄÄ, R., MENCUCINNI, M., 2005. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica Monographs* **4**: 63.

Entregue para publicação em Agosto de 2007  
Aceite para publicação em Outubro de 2007